

APLICAÇÃO DE ESTABILIZADORES MULTI-BANDA EM UMA ESTRUTURA CENTRALIZADA DE CONTROLE PARA O AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES ELETROMECAÑICAS EM SEP

WESLEY PERES, FRANCISCO C. R. COELHO, RAYANE R. LEAL

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL-UFSJ/CEFET-MG), Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL), Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), São João del-Rei, MG, Brasil

wesley.peres@ufs.j.edu.br; franciscocoelho@ufs.j.edu.br;
rayanerayner@gmail.com

Abstract— This paper aims to investigate the application of Multi-Band Power System Stabilizers in a second level of a hierarchical control structure to damp power system oscillations. The control scheme is composed of two levels: the first one (local level) is based on the use of local signals and the second one (called centralized level) is based on the use of remote signals measured by phasor measurement units. The tuning problem is formulated as an optimization problem aiming at maximizing the damping ratio of the dominant eigenvalue in closed-loop operation, taking several operating conditions into account to ensure robustness. The results are compared to those obtained by using conventional controllers.

Keywords— Multi-Band power system stabilizers, hierarchical control, Particle Swarm Optimization.

Resumo — O presente trabalho objetiva investigar a aplicação de Estabilizadores de Sistemas de Potência Multi-Banda no segundo nível de uma estrutura hierárquica de controle para o amortecimento de oscilações em sistemas de potência. A estrutura de controle é composta de dois níveis: o primeiro é denominado de controle local e é baseado no uso de sinais locais. O segundo nível é denominado de controle central e é baseado no uso de sinais remotos medidos por unidades de medição fasorial sincronizada. O problema de ajuste é formulado como um problema de otimização visando a maximização do coeficiente de amortecimento do sistema em malha fechada considerando várias condições operativas para a garantia de robustez. Os resultados são comparados com aqueles obtidos quando se usa controladores convencionais na estrutura centralizada.

Palavras-chave— Estabilizadores de sistemas de potência multi-banda, controle hierárquico, Otimização baseada em Enxame de Partículas.

1 Introdução

Os Sistemas Eléctricos de Potência estão submetidos a perturbações contínuas (variações de carga e/ou geração) e esporádicas (ocorrência de faltas que alteram a topologia) que originam oscilações eletromecânicas de baixa frequência (oscilações dos ângulos dos rotores). Tais oscilações ocorrem devido ao desequilíbrio momentâneo entre os torques eléctrico e mecânico nas unidades geradoras e, caso não sejam amortecidas, podem ocasionar a perda de estabilidade bem como reduzir os limites de transferência de potência entre áreas (Dotta et al., 2009).

O amortecimento de oscilações eletromecânicas é realizado através da utilização de Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP) nos geradores síncronos ou nos equipamentos de compensação série ou paralela baseada em electrónica de alta potência (*Flexible AC Transmission Systems – FACTS*). Nos geradores, os ESP modulam a tensão de referência do Regulador Automático de Tensão (RAT) em regime transitório (Sauer & Pai, 1998).

Os ESP foram propostos na década de 70 e a tecnologia no desenvolvimento desses equipamentos está bem avançada:

i. *ESP Convencionais*: compostos por estágios de ganho e de compensação de fase. Os sinais mais utilizados são a velocidade angular (que sofre de interações torcionais adversas) e a potência eléctrica (que sofre de uma modulação excessiva de potência

reativa durante a variação de potência mecânica pela atuação do regulador de velocidade). Para compensar esses problemas, foi proposto o estabilizador baseado na potência acelerante no início da década de 90. Tais estabilizadores podem atuar satisfatoriamente no amortecimento de oscilações locais (1 a 3 Hz, entre geradores de uma mesma área). Também podem estabilizar modos de oscilação interarea (0,1 a 1 Hz, entre geradores de diferentes áreas eléctricas) caso os parâmetros de todos os ESP sejam simultaneamente ajustados (ajuste coordenado) (Cárdenas, 2011);

ii. *Estabilizador Multi-Banda (ESP-MB ou PSS4B)*: é baseado em uma estrutura de controle flexível e consiste de três bandas que correspondem a três faixas de frequência ou modos de oscilação: (i) baixa (0,01 a 0,1 Hz para modos globais – presentes em sistemas isolados), (ii) intermediária (0,1 a 1 Hz para modos interárea) e (iii) alta (1 a 10 Hz para modos locais). Cada banda contém dois ramos com blocos de ganho, compensação de fase e blocos híbridos. Esse ESP, proposto em (Grondin et al., 2003), foi padronizado pelo IEEE em (IEEE, 2006) e é capaz de prover amortecimento ao sistema em uma ampla faixa de frequência (Kamwa et al., 2005).

Do exposto anteriormente verifica-se a necessidade de se equipar os geradores: (i) com ESP convencionais e ajustá-los de forma simultânea para amortecer oscilações interarea ou (ii) com ESP-MB para atuar nessas oscilações. Ressalta-se que em ambos os casos o sinal de entrada em cada controlador é obtido localmente (no próprio gerador).

Por motivos técnicos e/ou econômicos o ajuste coordenado de ESP convencionais pode não ser possível. Considerando que o uso de ESP convencionais está bem consolidado (e não serão substituídos a curto e/ou médio prazo pelas empresas) e que o ESP-MB foi recentemente proposto, os ESP-MB podem demorar a serem aplicados amplamente na indústria.

Com isso, abre-se a oportunidade de se investigar os benefícios de uma Estrutura Hierárquica de Controle baseada no uso de sinais remotos amostrados remotamente por Unidades de Medição Fasorial Sincronizada (Zhang & Bose, 2008). A Estrutura Hierárquica possui dois níveis de controle: (i) *Local ou Descentralizado* no qual cada gerador é equipado por um estabilizador convencional baseado no uso de sinais localmente amostrados e (ii) *Central*, baseado no uso de sinais remotos que são processados e enviados aos geradores como um sinal suplementar, aumentando a observabilidade dos modos de oscilação.

Esse trabalho possui o objetivo de investigar a aplicação dos ESP-MB no controle centralizado (segundo nível do controle hierárquico) em um sistema equivalente brasileiro. O objetivo é verificar se a característica multi-banda dos ESP-MB é capaz de trazer melhores resultados do que aqueles fornecidos pelo uso de estruturas convencionais (com estágios de ganho e de compensação de fase).

O procedimento será formulado como um problema de otimização capaz de maximizar o amortecimento do sistema em malha fechada considerando vários cenários de operação para garantia de robustez. O método de Otimização baseado em Enxame de Partículas (*PSO*) será utilizado para a solução do problema. Situações de perda de canais de comunicação (usados para transmissão de sinais remotos) e variação do tempo de atraso na transmissão dos sinais serão analisadas. Por fim, simulações no domínio do tempo serão conduzidas para validação dos resultados.

2 Apresentação das Estruturas de Controle e dos Controladores

2.1 Controle Hierárquico

A Figura 1 ilustra as estruturas de controle (descentralizada e centralizada) em um SEP composto de dois geradores que participam de ambos os níveis do controle hierárquico. No controle centralizado, baseado no uso de sinais remotos, o tempo de atraso na transmissão do sinal é considerado (*Atraso*). Observa-se que cada gerador recebe um sinal do controle local e um do controle central. O sinal de controle é

utilizado para modular a tensão de referência do Regulador Automático de Tensão (*RAT*).

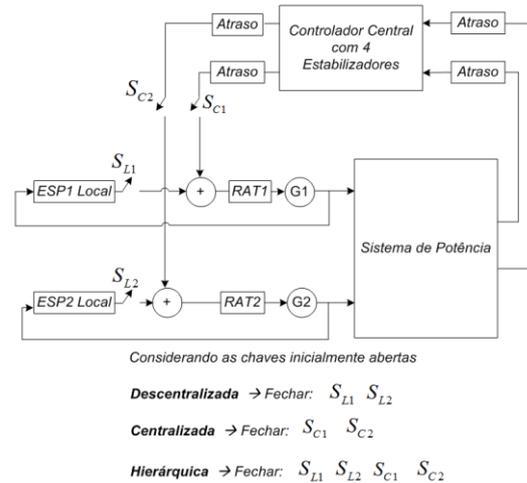


Figura 1. Estruturas de controle consideradas (Dotta et al., 2009).

2.2 Estabilizador de Sistemas de Potência Convencional

Neste trabalho, o primeiro nível de controle (*Local*) será baseado no uso de ESP convencionais baseados no sinal de velocidade angular. Em contrapartida, o segundo nível (*Central*) será baseado no uso de ESP convencionais ou Multi-Banda ESP-MB.

A função de transferência de cada estabilizador convencional do controle hierárquico (em ambos os níveis) é apresentada na equação ((1)).

$$ESP_p(s) = K_p x \frac{(s \cdot T_w)}{(1 + s \cdot T_w)} x \frac{\left(1 + s \frac{\sqrt{\alpha_p}}{\omega_p}\right)^{nb}}{\left(1 + s \frac{1}{\omega_p \cdot \sqrt{\alpha_p}}\right)^{nb}} \quad (1)$$

em que T_w é a constante de tempo do filtro *washout*, usado para que o estabilizador atue somente no regime transitório (essa constante é conhecida) e nb é o número de compensadores de atraso e/ou avanço utilizados (parâmetro também conhecido). Os parâmetros a serem ajustados para o controlador são: o ganho K_p , o parâmetro de compensação de fase α_p e a frequência onde ocorre a máxima compensação de fase ω_p .

2.3 Estabilizador Multi-Banda (ESP-MB)

A modelagem completa do ESP-MB pode ser obtida em (Kamwa et al., 2005). O presente trabalho é focado no modelo simplificado do ESP-MB proposto em (Grondin et al., 2003), recomendado pelo *IEEE* em (IEEE, 2006) e apresentado na Figura 2.

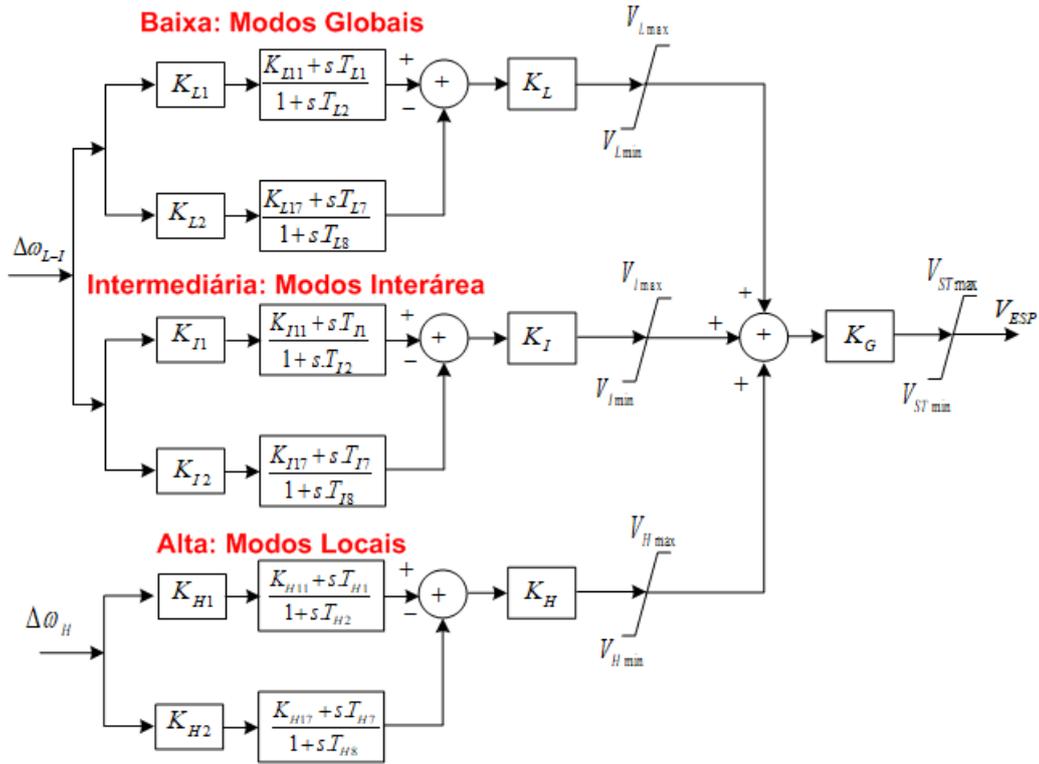


Figura 2. Estrutura Simplificado do ESP-MB.

Nesse modelo, cada banda é analisada como um filtro passa banda e existem sete parâmetros de ajuste:

- i. Frequências Centrais das bandas: baixa (F_L), intermediária (F_I) e alta (F_H). É importante mencionar que essa metodologia simplificada permite obter filtros passa banda com frequências centrais bem separadas, que é o propósito do ESP-MB;
- ii. Ganhos nas frequências centrais para as três bandas: baixa (K_L), intermediária (K_I) e alta (K_H). Os ganhos são aumentados da frequência baixa até a alta com o objetivo de fornecer amortecimento e compensação de fase adequada em toda a faixa de frequência na qual o ESP-MB atua.
- iii. Ganho K_G incluído em série com a saída do ESP-MB.

Na Figura 3 consta a representação gráfica do modelo simplificado.

Conforme ilustrado na Figura 4, as frequências de entrada do modelo simplificado são obtidas a partir de transdutores conforme consta em (IEEE, 2006). Outra modelagem permite derivar: (i) o sinal $\Delta\omega_{L-I}$ a partir da velocidade (entrada para as bandas de frequência baixa e intermediária, modos globais e interárea) e (ii) o sinal $\Delta\omega_H$ a partir da potência elétrica (entrada para a banda alta, modos locais).

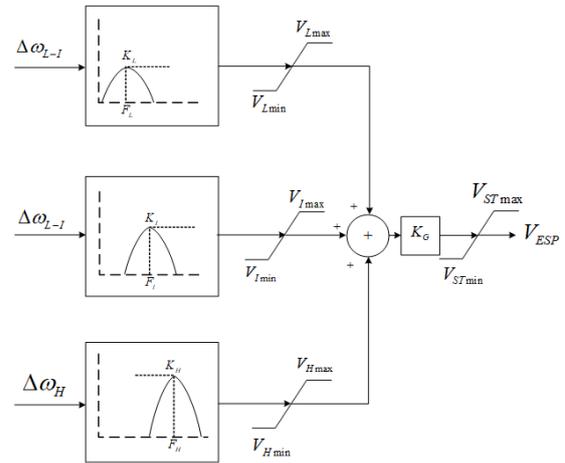


Figura 3. Representação do modelo simplificado do ESP-MB.

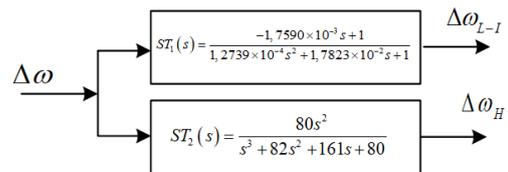


Figura 4. Transdutores do desvio de velocidade do ESP-MB.

Uma vez que as frequências centrais e os respectivos ganhos são conhecidos, é possível calcular as constantes de tempo do estabilizador ilustrado na Figura 2, conforme apresentado nas equações (2)-(6). Conforme (Kamwa et al., 2005), a constante R , que controla a largura da banda, é ajustada em 1,2. Essas

equações estão associadas com a banda de baixa frequência e podem ser estendidas para as outras bandas.

$$T_{L2} = T_{L7} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot F_L \cdot \sqrt{R}} \quad (2)$$

$$T_{L1} = T_{L2}/R \quad (3)$$

$$T_{L8} = T_{L7} \cdot R \quad (4)$$

$$K_{L1} = K_{L2} = \frac{R^2 + R}{R^2 - 2R + 1} \quad (5)$$

$$K_{L11} = K_{L17} = 1 \quad (6)$$

No presente trabalho, a banda de baixa frequência não será considerada, pois esta é utilizada para o amortecimento de modos globais, presentes em sistemas isolados (o que não é o caso do sistema empregado nesse artigo). Adicionalmente, o ganho global K_G não será utilizado, pois foi verificado (neste trabalho) que ganhos elevados podem deteriorar o desempenho do controle centralizado baseado no ESP-MB. Portanto, para cada estabilizador do controle central, existem quatro parâmetros a serem ajustados: duas frequências centrais e dois ganhos nas frequências centrais.

3 Apresentação do Problema

3.1 Modelo do Sistema em Malha Aberta

Para o projeto de controladores, o sistema de potência é modelado em espaço de estados (no domínio do tempo). Para isso, as equações que descrevem o comportamento dinâmico do sistema são linearizadas em torno de um ponto de operação j , conforme descrito na equação (7).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_{aj} x + B_{aj} u \\ y &= C_{aj} x + D_{aj} u \end{aligned} \quad (7)$$

em que x são as variáveis de estado (velocidade das máquinas, ângulos e tensões de campo), u representa as variáveis de entrada (tais como os sinais de controle: tensão de referência dos reguladores de tensão) e y são as variáveis de saída (como a velocidade terminal das máquinas). As matrizes em malha aberta em uma condição operativa j são: estados (A_{aj}), entrada (B_{aj}), saída (C_{aj}) e transmissão direta (D_{aj}).

Em malha aberta os geradores possuem somente os reguladores automáticos de tensão. Portanto, o sistema não possui estabilizadores. A estrutura das matrizes da formulação em espaço de estados para o problema em questão pode ser obtida em (Sauer & Pai, 1998).

A estabilidade do sistema em um determinado ponto de operação pode ser avaliada através do coeficiente de amortecimento dos autovalores da matriz de estados: os sistemas instáveis possuem coeficientes de amortecimento negativos (Sauer & Pai, 1998).

3.2 Modelo das Estruturas de Controle

A estrutura de controle local e central pode ser expressa matricialmente considerando seus respectivos estabilizadores.

Considerando-se q estabilizadores no controlador local (descentralizado), pode-se representar essa estrutura de controle por uma matriz diagonal $ESP_{local}(s)$ conforme a equação (8).

$$ESP_{local}(s) = \begin{bmatrix} ESP_1(s) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & ESP_q(s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

O controlador central pode ser representado por uma matriz genérica $ESP_{central}(s)$ de ordem ($q \times p$) conforme a equação (9). Nesse caso: q é o número de saídas do controlador (número de geradores que recebem sinais do controlador central) e p é o número de entradas do controlador (número de geradores que enviam seus sinais remotos de velocidade para o controle central).

$$ESP_{central}(s) = \begin{bmatrix} ESP_{11}(s) & \dots & ESP_{1p}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ESP_{q1}(s) & \dots & ESP_{qp}(s) \end{bmatrix} \quad (9)$$

3.3 Modelo dos Tempos de Atraso

O tempo de atraso na transmissão de sinais remotos foi modelado usando a Aproximação de Padé conforme a equação (10). Essa aproximação foi adotada em (Dotta et al., 2009; Cárdenas, 2011) e apresenta uma resposta nula em $t = 0$, sendo adequada para a modelagem de sistemas com atraso.

$$e^{-sT} = \frac{-(2T) \cdot s + 6}{(T^2) \cdot s^2 + (4T) \cdot s + 6} \quad (10)$$

3.4 Processo de Realimentação

Neste trabalho, o processo de inclusão dos controladores no sistema (processo de realimentação) é feito em duas etapas.

Inicialmente o controlador local é inserido no sistema. O controlador $ESP_{local}(s)$ pode ser representado em espaço de estados conforme a equação (11).

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= A_c x_c + B_c u_c \\ y_c &= C_c x_c + D_c u_c \end{aligned} \quad (11)$$

em que x_c são as variáveis de estados dos controladores, u_c são os sinais de desvio de velocidade e y_c são as variáveis com os sinais adicionais estabilizantes (tensões).

Em seguida, o controlador central é inserido considerando os tempos de atraso de transmissão do sinal. O controlador central $ESP_{central}(s)$ considerando os tempos de atraso também pode ser representado de acordo com a equação (11).

3.5 Sistema em Malha Fechada

O sistema em malha fechada para o ponto de operação j considerando a estrutura de controle projetada será dada pela equação (12).

$$\begin{aligned} \dot{x}_f &= A_{fj} x_f + B_{fj} u_f \\ y_f &= C_{fj} x_f + D_c u_f \end{aligned} \quad (12)$$

Itaipu e outro associado à oscilação entre o sistema Sul (G1, G2 e G3) e Sudeste mais Itaipu.

O procedimento de ajuste é realizado considerando cinco pontos de operação pré-selecionados para o sistema, descritos na Tabela 1. O mínimo amortecimento em malha aberta para cada ponto é apresentado: observa-se que o sistema é instável. O sexto cenário não será considerado na fase de projeto e será utilizado para a análise da robustez dos controladores projetados.

Tabela 1. Característica em Malha Aberta.

Caso	Configuração	ξ_{min} (%)
1	$X_{5-6} = 0,39$ pu $X_{6-7} = 0,57$ pu	-11,90
2	$X_{5-6} = 0,50$ pu $X_{6-7} = 0,57$ pu	-12,10
3	$X_{5-6} = 0,80$ pu $X_{6-7} = 0,57$ pu	-12,66
4	$X_{5-6} = 0,39$ pu $X_{6-7} = 0,63$ pu	-14,04
5	$X_{5-6} = 0,39$ pu $X_{6-7} = 0,70$ pu	-16,59
6	Caso 1 com redução de 2,4% de carregamento	-12,68

4.2 Inclusão do Controle Local

Conforme previamente comentado na seção 3.6, parte-se do princípio que as empresas configuraram os seus respectivos estabilizadores de acordo com métodos de projeto normatizados pela concessionária. O ajuste não coordenado baseado em técnicas de controle clássico apresentado em (Martins, 1986; Dotta et al., 2009) e reproduzido na Tabela 2 será utilizado.

Tabela 2. Controle Local.

Geradores	K_p	α	ω
01, 02, 03	10,000	4,000	6,667
04	16,000	8,000	5,439

Neste trabalho, são considerados dois blocos de compensação de fase e a constante de tempo do filtro *washout* é igual a 3 segundos.

Com o controle local, o sistema é estável nas seis condições operativas consideradas. Entretanto um amortecimento mínimo de 2,95% é obtido para o quinto cenário. No presente trabalho, a melhoria do amortecimento será buscada pelo ajuste do controlador central utilizando o método *PSO*. Serão considerados tanto estabilizadores convencionais quanto estabilizadores multi-banda na implementação do controlador central.

4.3 Estrutura do Controle Central

A Figura 6 apresenta o esquema do controlador centralizado, composto por 4 estabilizadores: os geradores 3 e 4 foram selecionados, a partir de análise modal, para participarem do controle centralizado.

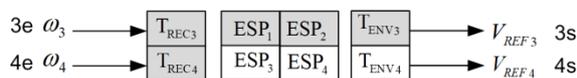


Figura 6. Estrutura do controlador central

Os tempos de recepção dos sinais remotos e de envio do sinal de controle são considerados. Como exemplo, o sinal de controle a ser injetado no gerador 3 é uma composição dos sinais remotos processados no controlador central, conforme destacado na Figura 6. Os índices (3s) e (3e) indicam, respectivamente, a primeira saída do controlador central (a ser injetada em G3) e a primeira entrada (sinal remoto medido em G3). A mesma notação é aplicada aos demais sinais. Inicialmente os sinais remotos de velocidade são medidos pelas Unidades de Medição Fasorial Sincronizadas (UMFS) e enviados ao controlador central. Em seguida, os sinais processados no controle central são reenviados para os geradores.

Para efeitos de ilustração, a Tabela 3 apresenta a dimensão das matrizes em espaço de estados (número de autovalores) e do problema de otimização (número de variáveis ou parâmetros a serem otimizados).

Tabela 3. Dimensão do Sistema e do Problema de Otimização.

Cenário	Malha Aberta	Malha Fechada - Hierárquico		
		Somente Local	Com Central Convencional	Com Central Multi-Banda
--	--	--	--	--
Dimensão da Matriz de Estados	30	42	70	94
Variáveis de Otimização	--	--	12	16

4.4 Procedimento de Ajuste

A Tabela 4 apresenta os limites adotados para as variáveis de otimização para o projeto do controle central considerando os dois tipos de controladores: convencional e multi-banda (IEEE, 2006). Foram considerados 50 indivíduos e 100 gerações.

Tabela 4. Parâmetros Utilizados no Processo de Ajuste.

Tipo	Parâmetro	Mínimo	Máximo
ESP-MB	F_{Ip}	0,10	1,00
	F_{Hp}	1,00	10,00
	K_{Ip}	0,01	40,00
	K_{Hp}	0,01	120,00
ESP-Convencional	K_p	0,01	20,00
	α_p	0,10	10,00
$T_w = 3$ seg $nb = 2$	ω_p	1,25	30,00

Adicionalmente, cita-se que na fase do projeto, os tempos de recepção dos sinais remotos ($T_{REC} = 200$ ms) e de envio do sinal de controle ($T_{ENV} = 200$ ms) foram considerados. Ressalta-se que o projeto foi realizado considerando os cinco primeiros cenários da Tabela 1.

4.5 Resultados do Processo de Otimização

A Tabela 5 apresenta os parâmetros otimizados para os quatro estabilizadores do controle central. Em ambas as configurações, o coeficiente de amorte-

cimento mínimo ξ_{\min} obtido na fase do projeto (5 cenários) foi superior à 10%, margem considerada adequada para a operação de sistemas elétricos. Adicionalmente, verifica-se que o coeficiente de amortecimento ξ_{\min} 6º no sexto cenário, não considerado na fase do projeto, também é superior a 10% e não variou muito em relação aos cenários considerados (primeiro ao quinto).

Tabela 5. Parâmetros de Ajuste.

ESP	ESP-MB				ESP-Convencional		
	F_{Ip}	F_{Hp}	K_{Ip}	K_{Hp}	K_p	α	ω
01	1,00	6,17	19,19	92,46	20,00	5,41	16,61
02	0,41	5,54	0,01	47,61	20,00	10,00	9,88
03	0,81	5,44	0,01	55,37	5,55	2,80	20,42
04	0,11	7,21	30,17	54,83	0,01	10,00	12,62
ξ_{\min}	10,23 % no 3º cenário				12,28 % no 3º cenário		
ξ_{\min} 6º	10,20 %				11,62 %		

O tempo de simulação do PSO foi inferior a 20 minutos para os dois esquemas de controle, o que não é problema para o projeto dos controladores.

4.6 Simulações no Domínio do Tempo

Com o objetivo de validar os controladores projetados, foi considerada uma perturbação do tipo degrau unitário de 1% na tensão de referência de Itaipu considerando o 5º cenário. A partir das Figuras 7 e 8 observa-se que ambos os controladores foram capazes de melhorar a resposta dinâmica do sistema.

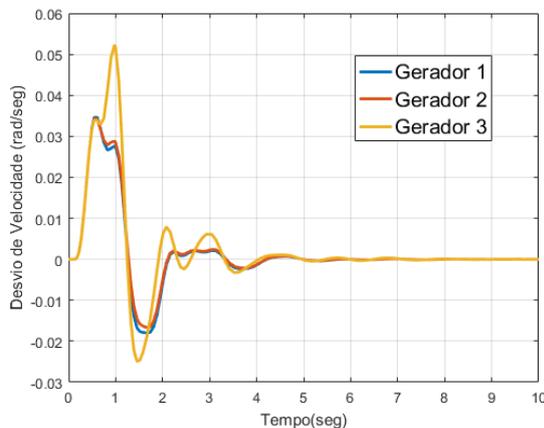


Figura 7. Desvio de Velocidade com o Controle Central – ESP Convencionais.

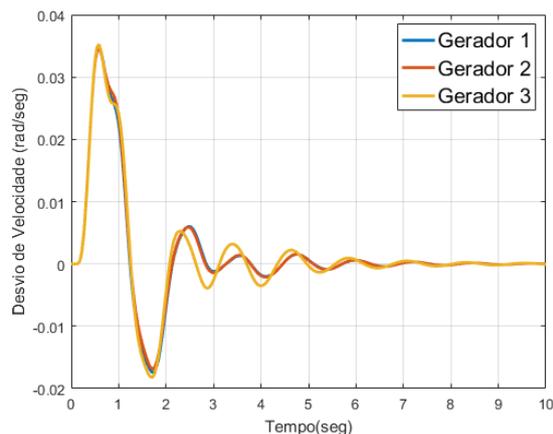


Figura 8. Desvio de Velocidade com o Controle Central – ESP-MB.

4.7 Robustez quanto a Perda de Canais de Comunicação

Os canais de comunicação mais indicados para fins de controle em sistemas elétricos são aqueles baseados em fibra-ótica (Dotta et al., 2009). Na fase do projeto não foram considerados cenários que contemplavam a ausência desses canais. O objetivo dessa seção é avaliar a robustez da estrutura de controle projetada quanto a esse quesito, conforme apresentado na Tabela 6.

Os índices utilizados na coluna “combinação” estão de acordo com a Figura 6. A combinação “3e-4s”, por exemplo, indica a perda do canal de comunicação que envia o sinal para o G4 e o canal que transmite o sinal de velocidade do G3.

Tabela 6. Análise da Robustez quanto a Perda de Canais.

Sinal Perdido	Especificação	Combinação	ξ_{\min} (%)	
			ESP-MB	ESP-Conv.
1 canal	1 entrada	3e	3,16	4,51
		4e	8,32	5,19
	1 saída	3s	3,24	2,60
		4s	6,78	11,10
2 canais	1 entrada e 1 saída	3e-3s	2,87	2,95
		3e-4s	3,24	4,51
		4e-3s	3,32	2,61
		4e-4s	5,76	5,38
4 canais	2 entrada e 2 saídas	3e-4e-3s-4s Controle Local	2,95	2,95

De forma geral observa-se o impacto negativo da perda de canais de comunicação, principalmente o canal que envia o sinal de controle para o G3: isso era esperado, uma vez que o G3 pertence à área Sul, que oscila tanto com o gerador de Itaipu quanto com o Sistema Sul Sudeste. Em relação ao desempenho dos dois tipos de controladores, não foram observadas variações significativas.

4.8 Robustez quanto a Variação do Tempo de Atraso

O tempo total de atraso considerado na fase do projeto foi de 400ms (200ms para envio e 200ms para recepção). Com o objetivo de avaliar a robustez quanto a variação no tempo de atraso, considere a Tabela 7.

Tabela 7. Análise 1 da Robustez quanto a Variação do Tempo de Atraso: Coeficientes de Amortecimento Mínimo (%).

Tempo Total de Atraso (ms)	ESP-MB	ESP-Convencional
50	4,59	1,04
100	3,82	-0,85
200	6,06	-2,25
400	10,20	11,62
600	-0,78	-1,69
800	-0,51	-1,08
1000	1,15	0,71

Observa-se que a estrutura baseada em ESP-MB apresentou um desempenho ligeiramente superior para situações em que o tempo de atraso é reduzido.

Desejando-se avaliar a robustez para uma faixa de variação mais restrita ($\pm 20\%$) em relação ao tempo de projeto (400ms), considere os valores apresentados na Tabela 8. É possível concluir que os controladores convencionais são mais robustos quanto à variação do tempo de atraso quando tais variações são reduzidas.

Tabela 8. Análise 2 da Robustez quanto a Variação do Tempo de Atraso: Coeficientes de Amortecimento Mínimo (%).

<i>Tempo Total de Atraso (ms)</i>	<i>ESP-MB</i>	<i>ESP-Convencional</i>
320	7,88	7,58
340	8,31	9,45
360	8,82	10,76
380	9,44	11,12
400	10,20	11,62
420	7,88	11,39
440	5,93	8,39
460	4,49	5,12
480	3,00	2,91

5 Conclusão

O presente trabalho apresentou um estudo comparativo entre dois tipos de estabilizadores aplicados no segundo nível de uma estrutura hierárquica de controle para o amortecimento de oscilações eletromecânicas em um sistema equivalente brasileiro. Foram considerados estabilizadores convencionais (ESP-C) e estabilizadores multi-banda (ESP-MB). O ajuste dos controladores foi feito através de um método de otimização com o objetivo de maximizar o coeficiente de amortecimento do autovalor dominante em malha fechada para vários pontos de operação (para garantia da robustez). As principais conclusões acerca do trabalho são:

- i. não existe uma diferença significativa quanto aos coeficientes de amortecimento obtidos;
- ii. a perda de canais de comunicação afeta ambas as estruturas, de igual forma, reduzindo o coeficiente de amortecimento e a margem de estabilidade;
- iii. o controlador baseado no ESP-MB mostrou-se mais robusto quando ocorrem variações significativas em relação ao tempo de atraso considerado no projeto;
- iv. simulações no domínio do tempo mostraram desempenho semelhante diante de perturbações no sistema.

Embora não apresentado por questões de espaço, ressalta-se que:

- i. os controladores ESP-MB permitem que o ganho em altas frequências seja reduzido, diminuindo problemas de interações com modos torcionais e saturações na saída do controle. Isso já foi bem explorado na literatura técnica (Peres et al., 2018);
- ii. desejando-se utilizar o controle central para o amortecimento dos modos interárea, procedeu-se com um teste levando em consideração somente a banda intermediária dos ESP-MB. Os resultados considerados não foram satisfatórios, pois um amortecimento mínimo de 4,46% foi obtido na fase do

projeto. Isso ocorre porque o controlador central atua no sistema de excitação dos geradores: nesse caso, o amortecimento dos modos locais pode ser deteriorado. Acredita-se que essa estratégia aplicada aos dispositivos *FACTS* (que atuam somente nos modos interárea) equipados com ESP-MB pode ser mais benéfica, sendo o enfoque de continuidade dessa pesquisa.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CEPEL pela autorização do uso do programa Pacdyn e à FAPEMIG, CAPES, CNPq e PPGEL/UFSJ pelo auxílio financeiro.

Referências Bibliográficas

- Cárdenas, S.L.E., 2011. Projeto de Estabilizadores de Sistemas de Potência utilizando Sinais Remotos via Algoritmos Genéticos. Ph.D. dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Dotta, D., Silva, A.S. & Decker, I.C., 2009. Wide-Area Measurements-Based Two-Level Control Design Considering Signal Transmission Delay. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24, pp.208-16.
- Grondin, R., Kamwa, I., Trudel, G. & Taborda, J., 2003. Modeling and closed-loop validation of a new PSS concept, the multi-band PSS. In 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491), July 2003.
- IEEE, 2006. IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992): 'IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies'. Tech. rep. IEEE.
- Kamwa, I., Grondin, R. & Trudel, G., 2005. IEEE PSS2B versus PSS4B: the limits of performance of modern power system stabilizers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20, pp.903-15.
- Kennedy, J. & Eberhart, R., 1995. Particle swarm optimization., 1995, IEEE International Conference on Neural Networks, Nov 1995.
- Martins, N., 1986. Efficient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to Power System Small-Signal Stability Studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1, pp.217-24.
- Peres, W., Silva Júnior, I.C. & Passos Filho, J.A., 2018. Gradient based hybrid metaheuristics for robust tuning of power system stabilizers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 95, pp.47-72.
- Sauer, P. & Pai, M.A., 1998. *Power System Dynamics and Stability*. Prentice Hall.
- Zhang, Y. & Bose, A., 2008. Design of Wide-Area Damping Controllers for Interarea Oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23, pp.1136-43.